Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la república mexicana

• Ramón Domínguez • Eliseo Carrizosa • Guadalupe E. Fuentes •
• Maritza L. Arganis* • Javier Osnaya • Andrés E. Galván-Torres •
Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
*Autor para correspondencia

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-01

Resumen

Domínguez, R., Carrizosa, E., Fuentes, G. E., Arganis, M. L., Osnaya, J., & Galván-Torres, A. E. (enero-febrero, 2018). Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la república mexicana. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *9*(1), 5-29. 10.24850/j-tyca-2018-01-01.

En este artículo se presenta un análisis regional de las lluvias diarias máximas anuales registradas en más de 2 000 estaciones de la república mexicana. Los resultados permiten estimar de manera confiable las tormentas de diseño para cualquier cuenca en México. Para el análisis se agruparon 59 regiones de acuerdo con el relieve del terreno y la forma en la que los fenómenos hidrometeorológicos extremos lo afectan; además, se dividieron las precipitaciones diarias máximas anuales de cada estación entre su promedio respectivo, de manera que en todos los casos la media resulta 1 y la desviación estándar igual al coeficiente de variación. Para verificar la homogeneidad de cada zona se consideró la prueba de Fisher, pero tomando en cuenta que dicha prueba no es estrictamente aplicable a distribuciones extremas; se planteó además la generación de series sintéticas para validar el comportamiento de los coeficientes de variación de las muestras. Para la estimación de las tormentas de diseño se considera la conformación de hietogramas característicos para duraciones totales menores o mayores que un día.

Palabras clave: análisis regional, lluvias diarias máximas anuales, tormenta de diseño, duración, periodo de retorno, convectividad.

Abstract

Domínguez, R., Carrizosa, E., Fuentes, G. E., Arganis, M. L., Osnaya, J., & Galván-Torres, A. E. (January-February, 2018). Regional analysis in approaching design rainfall in Mexican Republic. Water Technology and Sciences (in Spanish), 9(1), 5-29. 10.24850/j-tyca-2018-01-01.

In this paper, we present a regional analysis of maximum daily rainfall recorded by more than 2 000 rain gauges in the Mexican Republic. The results allow to reliably estimate design storms for any watershed in Mexico. For the analysis we clustered 59 regions based on the terrain morphology and the way they are affected by extreme weather. Additionally the annual maximum daily precipitations were divided by their respective mean, resulting in samples with mean equal to 1 and standard deviation equal to the variation coefficient. To verify the homogeneity for each zone the Fisher test was considered, but taking in to account that such test is not strictly applicable to extreme distributions; it was also proposed to generate synthetic series to validate the variation coefficient behavior of the sample. To estimate the design storms, characteristic hyetographs were obtained for total durations higher or lower than one day.

***Keywords**: Regional analysis, daily annual maximum rainfall, design storm, duration, return period, convectivity.*

Recibido: 04/11/2016
Aceptado: 15/04/2017

Introducción

En México existe información de lluvias diarias medidas en más de 5 000 estaciones; el análisis de estos registros muestra que en muchas estaciones los datos disponibles son escasos, de manera que los análisis estadísticos que se realicen de forma individual no resultan confiables (p. ej., la Comisión Nacional del Agua (Conagua) utiliza sólo 1 788 estaciones para el cálculo de las normales climatológicas) (Conagua, 2015). En el caso de los registros pluviográficos, la situación es peor tanto por lo limitado del número de estaciones como por la calidad y accesibilidad de esa información.

Se han hecho numerosos intentos para estimar lluvias asociadas con distintas duraciones

y periodos de retorno (Conde, Vita, Castro, & López, 2014; SCT, 1990), pero en ellas se efectúa un análisis individual, estación por estación, lo que con frecuencia da lugar a inconsistencias en los resultados.

Son amplios los estudios que se han realizado en los últimos años y en distintos países sobre el análisis regional de frecuencias de precipitaciones, algunos apoyados en la técnica de momentos L (Escalante & Reyes, 2005), además del análisis de componentes principales (Gellens, 2002; St-Hilaire *et al*., 2003; Wotling, Bouvier, Danloux, & Fritsch, 2000); el uso de técnicas cluster (análisis de racimos) para la agrupación regional técnica estaciones, año; el método de Dalrymple, y análisis de cuantiles y cálculo de fractiles (Dalrymple, 1960; Conleth, 1988, Buishand, 1991; Cunnane, 1988; Gellens, 2002; Yang et *al*., 2010). Algunos autores proponen utilizar la distribución general de valores extremos (GEV) para el análisis de precipitaciones extremas para distintas duraciones (Rossi, Fiorentino, & Versace, 1984; Gellens, 2002; St-Hilaire *et al*., 2003). Koutsoyiannis (2009 a y b) indica en su caso de estudio que una función de valores extremos tipo II llega adecuarse mejor que las funciones Gumbel a registros de precipitación, incluso con pocos datos.

Berndtsson y Niemczynowicz (1988) hicieron una revisión del estado del arte de los distintos factores involucrados en el análisis de precipitaciones; hacen énfasis en las escalas de tiempo y espacio que se deben utilizar, dependiendo del alcance del problema hidrológico; destacan los dos tipos de análisis de precipitación: a nivel puntual para obtener el periodo de retorno de lluvias con distintas características y el análisis de simultaneidad de las precipitaciones considerando distintos sitios para hacer estimaciones areales.

En México se han hecho estudios de regionalización de tormentas en la cuenca del Valle de México (Cortés, 2003). Guichard y Domínguez (1998), en su estudio de regionalización de cuencas del Alto Grijalva, consideran diversos estudios sobre los factores de reducción por área, por periodo de retorno y por duración (Bell, 1969; Chen, 1983). Destacan los estudios de regionalización de precipitaciones usando la distribución general de valores extremos realizados en San Luis Potosí, Sinaloa, México (Campos-Aranda, 2008, 2014). También se han hecho mapas de factores de regionalización en la república mexicana (Mendoza, 2001), además de la estimación regional de factores de convectividad (Baeza, 2007), así como mapas de precipitaciones para distintos periodos de retorno y duraciones (Domínguez *et al*., 2012; SCT, 1990); la regionalización de precipitaciones con funciones bivariadas y máxima entropía (Escalante-Sandoval & Domínguez, 2001); la influencia de la regionalización en la estimación de precipitaciones máximas diarias (Escalante-Sandoval & Amores-Rovelo, 2014); el cambio climático a escala regional en precipitación y temperatura (Magaña & Galván, 2010).

En este trabajo se hacen análisis regionales a partir de la información de 2 293 pluviómetros, lo que permite estimar precipitaciones de diseño (asociadas con diversos periodos de retorno) para distintas duraciones; se presenta también un procedimiento que utiliza series sintéticas para la validación de las zonas homogéneas mediante la comparación de los coeficientes de variación históricos y sintéticos. Al hacer el análisis regional se logran resultados espacialmente consistentes, evitando las inconsistencias que se obtienen cuando se analiza cada estación de forma individual.

En relación con duraciones menores que un día, se retoman los resultados de Baeza y Mendoza (Baeza, 2007; Mendoza, 2001), quienes usaron la información original recopilada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 1990), así como datos consignados en boletines de la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos (notablemente, los boletines de la Comisión del Papaloapan), pero la manejaron regionalmente utilizando el concepto de "convectividad", apoyado en la teoría desarrollada por Chen (1983), y considerando la conformación topográfica y climatológica del entorno de cada estación. Los resultados obtenidos permiten estimar hietogramas de diseño para distintos intervalos de tiempo y diversas duraciones totales de la tormenta, utilizando el método de bloques

• ISSN 0187-8336

alternos (Chow, Maidment, & Mays, 1988), para cualquier cuenca de la república.

Metodología

Se analizaron los datos de un total de 2 293 estaciones de la base de datos *Climate Computing Project* (Clicom) (figura 1). En el cuadro 1 se muestra el número de estaciones consideradas en cada estado, así como el promedio de años de registro correspondiente.

Para la selección de las 2 293 estaciones se verificó que cumplieran con los siguientes requisitos:

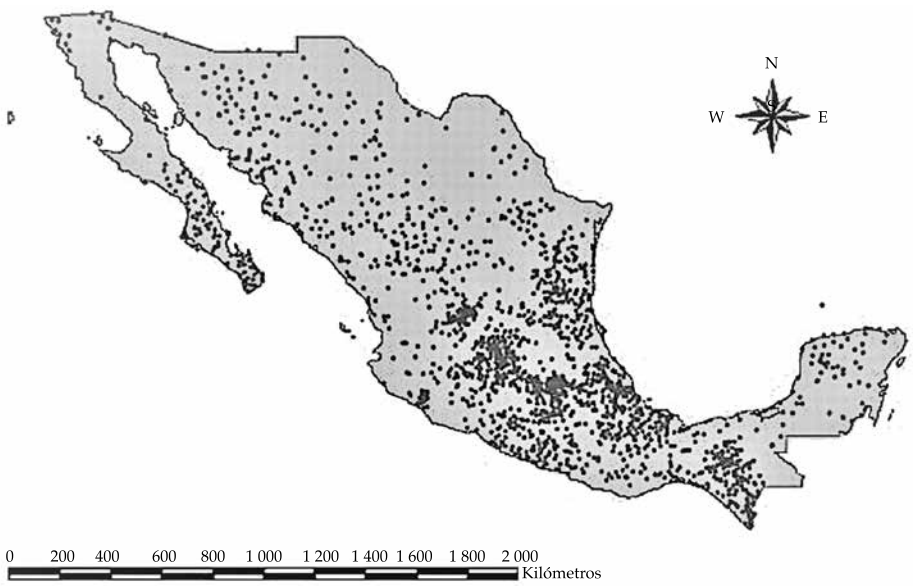

Figura 1. Estaciones procesadas.

Cuadro 1. Estaciones seleccionadas por estado.

Entidad federativa	Número de estaciones al 2010	Promedio de años de registro*	Entidad federativa	Número de estaciones al 2010	Promedio de años de registro*
Aguascalientes	50	35.18	Morelos	44	33.68
Baja California Norte	37	32.68	Nayarit	25	30.32
Baja California Sur	72	33.03	Nuevo León	55	31.27
Campeche	42	32.64	Oaxaca	129	29.93
Chiapas	109	33.55	Puebla	98	38.56
Chihuahua	58	30.84	Querétaro	34	32.24
Coahuila	28	33.76	Quintana Roo	20	30.8
Colima	17	46.76	San Luis	103	32.23
Ciudad de México	30	28.9	Sinaloa	51	31.1
Durango	83	42.39	Sonora	79	32.75
Estado de México	114	27.7	Tabasco	42	35.79
Guanajuato	108	37.86	Tamaulipas	109	30.28
Guerrero	125	39.75	Tlaxcala	20	32.6
Hidalgo	66	44.2	Veracruz	190	31.1
Jalisco	180	39.74	Yucatán	30	29.97
Michoacán	93	34.37	Zacatecas	51	30.08
			Total	**2 293**	**33.94**

ISSN 0187-8336 •

- Estaciones operando por al menos 20 años y con la información completa en ese periodo de registro.
- En el caso de las zonas centro y sur del país se incluyeron estaciones en las que los datos faltantes correspondieran a la temporada de estiaje. En el noroeste, por la presencia de lluvias intensas en época invernal, sólo se incluyeron estaciones con registro completo.

Para cada una de las estaciones se obtuvieron los valores diarios máximos anuales y se calcularon los estadísticos: media, desviación estándar, coeficiente de variación (CV), además del valor máximo y valor mínimo. El análisis de estos estadísticos permitió hacer una depuración de los valores que en primera instancia parecieron ilógicos (por un lado valores muy pequeños o inclusive cero de las máximas precipitaciones en todo un año y por otro valores muy grandes, del orden de cuatro veces la media). En el caso de los valores muy grandes, se consultaron las hojas de registro originales, con ayuda de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR); de acuerdo con los resultados de esa consulta se eliminaron los incorrectos.

Con los valores depurados y tomando en cuenta tanto los coeficientes de variación como la conformación topográfica se definieron regiones homogéneas desde el punto de vista de las precipitaciones diarias máximas anuales, considerando que si en una región los coeficientes de variación son similares y los valores máximos anuales de cada estación se modulan dividiéndolos entre su media, las muestras moduladas tendrán media igual a 1 y una desviación estándar similar. Para comprobar la hipótesis de homogeneidad entre las muestras así obtenidas se utiliza tradicionalmente la prueba de Fisher (Domínguez *et al.*, 2014), pero considerando que los valores máximos no corresponden a una distribución de probabilidades normal, en este trabajo se propone un nuevo procedimiento para verificar la hipótesis de que las muestras históricas provienen de una población caracterizada por la función de distribución ajustada a la muestra ampliada. Para ello se generan series sintéticas y se calculan los CV de un conjunto de muestras, del tamaño de las históricas, obtenidas a partir de la función de distribución ajustada. La región es considerada homogénea si el rango de los CV simulados incluye al conjunto de los CV históricos (Domínguez-Mora, Bouvier, Neppel, & Niel, 2005).

Las muestras homogéneas obtenidas para cada región estarán entonces conformadas por mucho más valores que los correspondientes a cada estación considerada individualmente, de manera que los resultados obtenidos al ajustarles una función de distribución de probabilidades serán mucho más confiables y robustos.

Relaciones precipitación -duración-periodo de retorno

Estimaciones para duraciones de tormenta menores que una hora

La estimación de gastos de diseño para cuencas pequeñas o medianas requiere conocer las precipitaciones medias asociadas con duraciones menores que un día, es decir, obtener las curvas precipitación duración-periodo de retorno.

Chen (1983) realizó estudios sobre las precipitaciones para diferentes periodos de retorno apoyado en los estudios generados por USBW en el Paper No. 40 (TP 40), y obtuvo una fórmula generalizada de intensidad-duración-periodo de retorno para cualquier localidad en EUA. De acuerdo con el estudio de Chen, se requiere obtener la altura de lluvia para un periodo de retorno de 10 años tanto para una hora (P_1^{10}) como para 24 horas (P_{24}^{10}); para un periodo de retorno de 100 años, la altura de lluvia para una hora (P_1^{100}). Con estos datos se obtienen los cocientes $R = (P_1^T / P_{24}^T)$ y $X = (P_1^{10} / P_1^{100})$. Además encontró que el cociente R que relaciona la relación de altura de lluvia con la duración varía entre un 10 y 60% con la ubicación geográfica y que probablemente es independiente del periodo de retorno; que la razón X de altura de lluvia con la frecuencia parece ser independiente de la duración y varía entre los rangos de 1.33 y 1.63. Estas relaciones

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IX, núm. 1, enero-febrero de 2018, pp. 5-29
• ISSN 0187-8336

se usaron para la construcción de la ecuación (1), con la cual se puede calcular la precipitación para cualquier duración y periodo de retorno:

$$P_t^T = \frac{a P_1^{10} \log\left(10^{2-x} T^{x-1}\right)}{\left(t+b\right)^c}\left(\frac{t}{60}\right) \qquad (1)$$

válida para $T \geq 1$ año y 5 min $\leq t \leq$ 24 h, donde P_t^T precipitación, en milímetros, para una duración t en minutos y un periodo de retorno T en años, $X = P_1^{100}/P_1^{10}$, a, b y c parámetros de la tormenta que se determinan según el factor $R = P_1^T/P_{24}^T$.

Baeza (2007) toma en cuenta que en México existe información pluviométrica suficiente como para estimar las precipitaciones asociadas con una duración de 24 h y cualquier periodo de retorno con mayor precisión que la que se obtiene usando la relación $X = P_1^{100}/P_1^{10}$ que propone Chen. Se concentra entonces en el análisis para la república mexicana del factor $R = P_1^T/P_{24}^T$, al que denomina "factor de convectividad", que, por el contrario, es difícil de estimar con buena precisión dada la escasez de datos pluviográficos disponibles en México. Para ello utiliza la información original recopilada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 1990), así como datos consignados en boletines de la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos (notablemente, los boletines de la Comisión del Papaloapan), pero la maneja regionalmente utilizando el concepto de "convectividad", al considerar la conformación topográfica del entorno de cada estación y su relación con los fenómenos meteorológicos predominantes en cada zona.

Estimaciones para duraciones mayores que un día

Adicionalmente, y trabajando con las mismas regiones, se obtienen máximos anuales promedio para duraciones de 2, 3,…, 30 días y su relación con las de un día, para cada una de las 2 293 estaciones estudiadas. Al promediar esta relaciones dentro de cada región se determinan factores que permiten una estimación confiable de las precipitaciones medias asociadas con duraciones de hasta 30 días a partir de las obtenidas para un día.

Resultados

Captura y depuración de la información

Se revisaron estaciones con por lo menos 20 años de registros completos. En el cuadro 1 se indica el número de estaciones seleccionadas, así como el número promedio de años de registro para cada estado de la república. En el cuadro 2 se muestra, a manera de ejemplo, el caso de Durango; se marcaron con azul los valores que parecieron extremadamente grandes y con rojo los que fueron eliminados cuando se pudo verificar en el registro original, proporcionado por la GASIR, que efectivamente se trata de errores de captura; adicionalmente se muestran, marcados con amarillo, los valores mínimos que parecieron ilógicos (típicamente valores nulos o de sólo unos cuantos milímetros en zonas lluviosas).

Conformación de regiones homogéneas

Considerando, por un lado, los coeficientes de variación de los valores máximos anuales, pero por otro la cercanía entre los sitios de medición, las características de la topografía en el entorno de dichos sitios y el tipo de fenómeno meteorológico que provoca las precipitaciones extremas, se buscó un compromiso entre definir regiones con muchas estaciones, a fin de que la muestra que se obtiene al suponer que provienen de la misma población resulte muy grande y por lo tanto las extrapolaciones a periodos de retorno grandes fueran más confiables, y limitar el tamaño de cada región, con lo que se tendría más confianza en la aceptación de la hipótesis de homogeneidad. Se definieron así las 59 regiones que se muestran en la figura 2. Asimismo, en el cuadro 3 se muestran los coeficientes de variación máximo y mínimo, al igual que el número de estaciones incluidas en cada región. Se hace notar que en sólo cinco casos se tienen coeficientes de variación mayores que 1 y en seis menores que 0.2.

ISSN 0187-8336 •

Cuadro 2. Tabla con correcciones Durango.

Año	Estación													
	10001	**10002**	**10003**	**10004**	**10012**	**10014**	**10016**	**10018**	**10020**	**10021**	**10028**	**10029**	**10030**	**10033**
1975	25	40	81	20	38	48		45	17	57	70		53	77
1976	35.5	60	136.8	20		48		144	42	32	53		54	25.5
1977		40	125	21.1	52.2	40		138		40	33			45
1978	40	62	88	28.8	28.5	36		84	53	60.3	31		33	32
1979	11.4		170	37	55	89		206	40	43	35			20.5
1980	8.9	45	50	37.5	57	43	35.5	106	46	47	38			28
1981	30		54.2	27	39	65	40.8	57	20	32.5	70		60	
1982	31.7	45	70	32	75.1		31.6		34	34.5	34		62.5	
1983	75	48	105	26.2	82.5		44.8	117	24	36	56.5		53	
1996		38		66	75.4		50		21	33.5	56	35		
1997	28	30	97	86.5	41.5		280	89	33	71.5	24		20	
1998	37.5	34		40.4	57.3				29	41.5	40		32.4	
2001	25	26		28.5			14		34	34.2	22.5		28.1	
2002	65			32.8	33		28	40	86	17.8	56	46	31.4	
2003	60			35	55.7			40	43	71.9	60	32	42.1	
2004	72		152	57.5			21	70	75.5	77.3	34.5		36.1	
2005	52.5		68.7	54.8	45.4		29.5	60	74	22.9	50.5		20.4	
2006	40		53	29.5	61.5		22			64	50	48	36.8	
2007			71.2					50		40	50		52.5	
2008			59.2		49.4			60	52		37.5	40		
2009			60	32.5				60						
2010	30		81					60						
media	40.234	48.135	88.314	37.414	48.019	52.655	40.679	93.649	40.097	42.979	45.125	40.784	44.270	54.979
Desv. est.	15.505	20.627	35.420	15.520	14.359	18.617	43.523	42.510	18.140	15.359	16.327	11.247	18.327	48.342
coef. var	**0.385**	**0.429**	**0.401**	**0.415**	**0.299**	**0.354**	**1.070**	**0.454**	**0.452**	**0.357**	**0.362**	**0.276**	**0.414**	**0.879**
máximo	75	137	189.5	86.5	82.5	89	280	206	86	84.6	111	84.3	98	250
mínimo	8.9	25	47	20	15	20.6	14	40	15.5	17.8	22	20	20	15
Años registro	29	37	35	43	53	29	34	45	36	66	60	61	33	38

Funciones de distribución de las muestras regionales

Los valores máximos anuales de precipitación diaria de cada estación se modularon dividiéndolos entre su media, de tal manera que, al agruparlos, se obtuvieron muestras con un gran número de elementos para cada una de las 59 regiones. A cada una de las 59 muestras ampliadas se les ajustaron funciones de distribución de probabilidades de tipo Gumbel (G) y Doble Gumbel (DG), que dieron los menores errores estándar de ajuste; con ellas se estimaron los valores asociados con distintos periodos de retorno, como se muestra a manera de ejemplo en la figura 3. En el cuadro 4 se muestran los resultados obtenidos para las 59 regiones con las distribuciones de probabilidad de mejor ajuste. Adicionalmente, se puede obtener el valor de la precipitación media anual para cualquier sitio

• ISSN 0187-8336

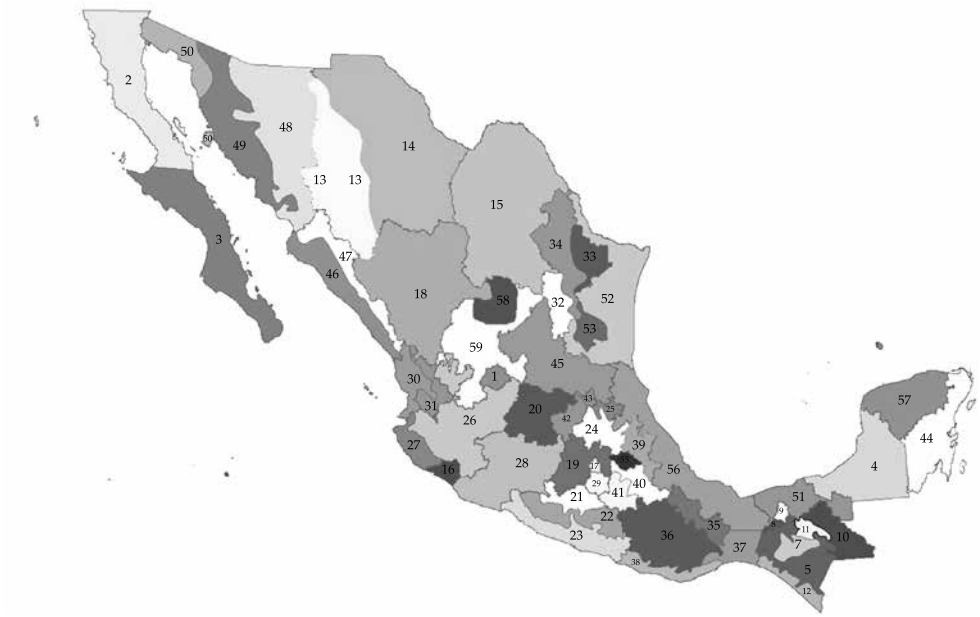

Figura 2. 59 regiones definidas tomando en cuenta coeficientes de variación y condiciones topográficas y meteorológicas. Fuente: Domínguez *et al.*, 2007. Proyecto Cenapred.

Cuadro 3. Número de estaciones y coeficientes de variación extremos en cada región.

Entidad federativa	Región	Núm. de estaciones	Coeficiente de variación máximo	Coeficiente de variación mínimo
Aguascalientes	Aguascalientes	50	0.46	0.24
Baja California Norte	Baja California Norte	37	1.31	0.41
Baja California Sur	Baja California Sur	72	1.36	0.46
Campeche	Campeche	42	0.93	0.26
Chiapas	Angostura	36	0.88	0.22
	Malpaso	17	0.66	0.24
	Chicoasén	21	0.79	0.22
	Peñitas	4	0.51	0.26
	Almandro	11	0.82	0.24
	Pichucalco	3	0.35	0.29
	Teapa	3	0.50	0.23
	Costa	28	0.57	0.23
Chihuahua	Bajos	18	0.43	0.22
	Restantes	40	0.96	0.24
Coahuila	Coahuila	28	1.04	0.31
Colima	Colima	17	0.68	0.39
Ciudad de México	Ciudad de México	30	0.50	0.21
Durango	Durango	83	1.07	0.23
Estado de México	Estado de México	114	0.50	0.20
Guanajuato	Guanajuato	108	0.49	0.22
Guerrero	Norte	36	0.48	0.18
	Centro	56	0.68	0.32
	Costa	37	0.61	0.21
Hidalgo	Menores	57	0.70	0.22

ISSN 0187-8336 •

Cuadro 3 (continuación). Número de estaciones y coeficientes de variación extremos en cada región.

Entidad federativa	Región	Núm. de estaciones	Coeficiente de variación máximo	Coeficiente de variación mínimo
	Mayores	5	0.52	0.43
Jalisco	Interior	153	0.53	0.20
	Costa	23	0.58	0.30
Michoacán	Michoacán	93	0.65	0.18
Morelos	Morelos	44	0.64	0.20
Nayarit	Costa	14	0.40	0.25
	Sierra	11	0.33	0.19
Nuevo León	I	10	0.93	0.29
	II	7	0.63	0.39
	III	38	1.01	0.38
Oaxaca	Golfo	29	0.53	0.26
	Altiplano	82	0.74	0.18
	Istmo	14	0.56	0.37
	Pacifico	4	0.59	0.43
Puebla	Norte	49	0.79	0.26
	Centro	34	0.67	0.21
	Sur	14	0.52	0.19
Querétaro	Zona Alta	7	0.49	0.26
	Zona Baja	27	0.64	0.24
Quintana Roo	Quintana Roo	20	0.64	0.28
San Luis Potosí	San Luis Potosí	103	0.94	0.27
Sinaloa	Zona I	21	0.77	0.39
	Zona II	30	0.62	0.20
Sonora	Zona I	57	0.85	0.17
	Zona II	21	0.77	0.33
	Zona III	2	0.77	0.77
Tabasco	Tabasco	32	0.53	0.24
Tamaulipas	Zona I	81	0.87	0.27
	Zona II	20	0.91	0.35
	Zona III	8	0.51	0.31
Tlaxcala	Tlaxcala	22	0.44	0.22
Veracruz	Veracruz	190	0.79	0.20
Yucatán	Yucatán	30	0.68	0.30
Zacatecas	Zona I	11	0.54	0.28
	Zona II	39	0.45	0.22
	Total	**2 293**		

de la república, con un mapa de la distribución de las medias de las precipitaciones máximas anuales (como el de la figura 4) y multiplicándolo por los factores por periodo de retorno correspondientes a la región en la que se encuentre el sitio de estudio, estimar la precipitación diaria asociada a cualquier periodo de retorno.

Estimaciones para duraciones de tormenta menores que una hora

En la figura 5 se muestra el mapa de los factores de convectividad estimados por Baeza (2007). Para obtener la precipitación asociada con una duración de una hora sólo se multiplica la

• ISSN 0187-8336

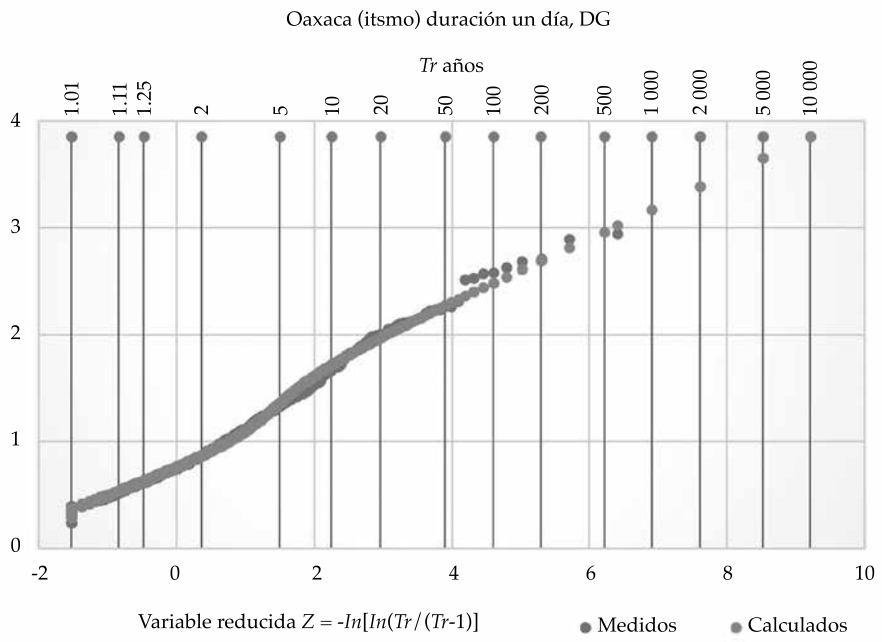

Figura 3. Función de distribución ajustada a los máximos anuales normalizados de la región Oaxaca Itsmo.

Cuadro 4. Factores por periodo de retorno para las 59 regiones.

Entidad Federativa	Región homogénea	Región	Factores de regionalización											
			TR años											
			2	5	10	20	50	100	200	500	1 000	2 000	5 000	10 000
Aguascalientes	1	Aguascalientes	0.94	1.25	1.45	1.64	1.90	2.08	2.27	2.52	2.71	2.89	3.14	3.33
	2	Baja California Norte	0.84	1.36	1.81	2.23	2.73	3.09	3.45	3.91	4.27	4.62	5.09	5.43
Baja California S	3	Baja California Sur	0.77	1.36	2.03	2.65	3.38	3.90	4.41	5.08	5.57	6.07	6.72	7.21
Campeche	4	Campeche	0.86	1.24	1.64	2.04	2.51	2.85	3.19	3.62	3.95	4.27	4.69	5.01
Chiapas	5	Angostura	0.90	1.19	1.46	1.81	2.29	2.65	3.00	3.46	3.81	4.15	4.61	4.95
	6	Malpaso	0.90	1.22	1.50	1.80	2.20	2.49	2.77	3.15	3.44	3.72	4.10	4.36
	7	Chicoasén	0.93	1.21	1.44	1.68	1.99	2.22	2.46	2.76	2.99	3.23	3.53	3.76
	8	Peñitas	0.91	1.22	1.50	1.79	2.18	2.47	2.76	3.13	3.41	3.69	4.07	4.35
	9	Almandro	0.89	1.22	1.53	1.89	2.36	2.70	3.03	3.47	3.80	4.13	4.55	4.90
	10	Pichucalco	0.95	1.24	1.44	1.63	1.87	2.05	2.23	2.47	2.66	2.84	3.08	3.26
	11	Teapa	0.94	1.25	1.46	1.66	1.91	2.10	2.29	2.54	2.73	2.92	3.17	3.36
	12	Costa	0.91	1.20	1.48	1.81	2.19	2.46	2.72	3.05	3.30	3.55	3.88	4.13
Chihuahua	13	Bajos	0.90	1.43	1.78	2.11	2.54	2.87	3.19	3.62	3.94	4.26	4.69	5.01
	14	Restantes	0.89	1.25	1.56	1.89	2.34	2.68	3.02	3.46	3.79	4.12	4.55	4.87
Coahuila	15	Coahuila	0.85	1.28	1.68	2.09	2.60	2.98	3.34	3.82	4.19	4.55	5.03	5.41
Colima	16	Colima	0.85	1.26	1.69	2.10	2.58	2.93	3.27	3.71	4.05	4.38	4.82	5.15
Ciudad de México	17	Ciudad de México	0.95	1.21	1.39	1.55	1.77	1.93	2.09	2.30	2.46	2.62	2.83	3.00
Durango	18	Durango	0.91	1.25	1.52	1.80	2.16	2.43	2.70	3.05	3.32	3.58	3.93	4.21
Estado de México	19	Estado de México	0.95	1.21	1.38	1.55	1.76	1.93	2.09	2.30	2.46	2.62	2.83	2.99
Guanajuato	20	Guanajuato	0.95	1.23	1.42	1.60	1.83	2.00	2.17	2.40	2.57	2.75	2.98	3.15
Guerrero	21	Norte	0.95	1.21	1.38	1.54	1.75	1.91	2.07	2.27	2.43	2.59	2.79	2.95

ISSN 0187-8336 •

Cuadro 4 (continuación). Factores por periodo de retorno para las 59 regiones.

	22	Centro	0.92	1.34	1.62	1.89	2.24	2.50	2.76	3.10	3.36	3.62	3.96	4.21
	23	Costa	0.90	1.24	1.52	1.80	2.15	2.40	2.65	2.99	3.24	3.49	3.82	4.07
Hidalgo	24	Menores	0.92	1.35	1.63	1.90	2.25	2.51	2.78	3.12	3.38	3.64	3.99	4.25
	25	Mayores	0.87	1.35	1.71	1.98	2.30	2.53	2.76	3.06	3.28	3.50	3.80	4.01
Jalisco	26	Interior	0.92	1.24	1.45	1.64	1.86	2.03	2.19	2.41	2.57	2.74	2.95	3.12
	27	Costa	0.93	1.30	1.55	1.79	2.09	2.32	2.55	2.85	3.08	3.31	3.61	3.84
Michoacán	28	Michoacán	0.92	1.21	1.45	1.69	1.98	2.20	2.42	2.70	2.92	3.14	3.42	3.64
Morelos	29	Morelos	0.95	1.21	1.39	1.56	1.77	1.93	2.10	2.31	2.47	2.63	2.84	3.01
Nayarit	30	Costa	0.95	1.22	1.40	1.58	1.80	1.97	2.13	2.36	2.52	2.69	2.91	3.08
	31	Sierra	0.95	1.20	1.37	1.53	1.73	1.88	2.04	2.24	2.39	2.54	2.74	2.90
Nuevo León	32	I	0.88	1.26	1.61	1.99	2.51	2.89	3.26	3.75	4.12	4.49	4.97	5.34
	33	II	0.91	1.38	1.69	1.99	2.38	2.67	2.96	3.34	3.63	3.92	4.30	4.59
	34	III	0.82	1.28	1.77	2.30	2.94	3.40	3.85	4.44	4.89	5.33	5.91	6.37
Oaxaca	35	Golfo	0.94	1.24	1.44	1.63	1.87	2.06	2.24	2.48	2.66	2.84	3.08	3.27
	36	Altiplano	0.91	1.22	1.46	1.76	2.2	2.53	2.86	3.28	3.6	3.92	4.33	4.64
	37	Istmo	0.87	1.36	1.72	1.97	2.27	2.48	2.69	2.96	3.17	3.38	3.65	3.85
	38	Pacífico	0.86	1.25	1.67	2.10	2.61	2.98	3.33	3.80	4.15	4.50	4.96	5.33
Puebla	39	Norte	0.93	1.32	1.57	1.82	2.14	2.38	2.61	2.93	3.16	3.40	3.72	3.95
	40	Centro	0.94	1.27	1.49	1.71	1.98	2.19	2.40	2.67	2.87	3.08	3.35	3.55
	41	Sur	0.94	1.26	1.47	1.67	1.92	2.12	2.31	2.57	2.76	2.95	3.21	3.40
Querétaro	42	Zona Alta	0.93	1.29	1.53	1.75	2.04	2.26	2.48	2.77	2.99	3.21	3.49	3.71
	43	Zona Baja	0.94	1.27	1.49	1.70	1.98	2.18	2.38	2.65	2.86	3.06	3.33	3.53
Quintana Roo	44	Quintana Roo	0.88	1.26	1.60	1.91	2.28	2.55	2.82	3.17	3.44	3.70	4.05	4.32
San Luis	45	San Luis	0.88	1.29	1.63	1.94	2.33	2.61	2.89	3.25	3.52	3.80	4.16	4.44
Sinaloa	46	Zona I	0.84	1.28	1.76	2.15	2.61	2.93	3.25	3.67	3.98	4.29	4.70	5.01
	47	Zona II	0.94	1.27	1.49	1.70	1.97	2.18	2.38	2.65	2.85	3.06	3.33	3.53
Sonora	48	Zona I	0.93	1.29	1.53	1.75	2.05	2.27	2.49	2.78	3.00	3.22	3.50	3.72
	49	Zona II	0.88	1.26	1.61	1.96	2.38	2.69	3.00	3.40	3.70	4.00	4.41	4.71
	50	Zona III	0.77	1.50	2.23	2.77	3.38	3.82	4.25	4.82	5.24	5.67	6.22	6.64
Tabasco	51	Tabasco	0.94	1.26	1.47	1.67	1.94	2.13	2.33	2.59	2.78	2.98	3.23	3.43
Tamaulipas	52	Zona I	0.89	1.31	1.61	1.88	2.20	2.43	2.66	2.96	3.19	3.42	3.72	3.95
	53	Zona II	0.85	1.26	1.69	2.18	2.81	3.26	3.70	4.27	4.71	5.14	5.72	6.12
	54	Zona III	0.91	1.32	1.59	1.82	2.09	2.29	2.49	2.75	2.94	3.14	3.39	3.59
Tlaxcala	55	Tlaxcala	0.95	1.22	1.40	1.57	1.79	1.96	2.13	2.35	2.51	2.68	2.90	3.06
Veracruz	56	Veracruz	0.90	1.27	1.56	1.83	2.15	2.39	2.62	2.93	3.16	3.39	3.69	3.93
Yucatán	57	Yucatán	0.93	1.32	1.59	1.84	2.17	2.41	2.66	2.98	3.22	3.47	3.79	4.03
Zacatecas	58	Zona I	0.92	1.34	1.62	1.88	2.23	2.48	2.74	3.08	3.33	3.59	3.92	4.18
	59	Zona II	0.95	1.23	1.42	1.60	1.84	2.02	2.19	2.42	2.60	2.77	3.00	3.18

obtenida para un día por el factor que corresponda. Adicionalmente, y de acuerdo con los resultados obtenidos por Chen (1983), para estimar los valores asociados con otras duraciones menores que 24 horas, se multiplican los de 1 h por los factores que se indican en el cuadro 5.

Estimaciones para duraciones mayores que un día

Cuando los estudios se realizan para cuencas grandes o para los ingresos a presas con capacidad de regulación significativa, se requiere

• ISSN 0187-8336

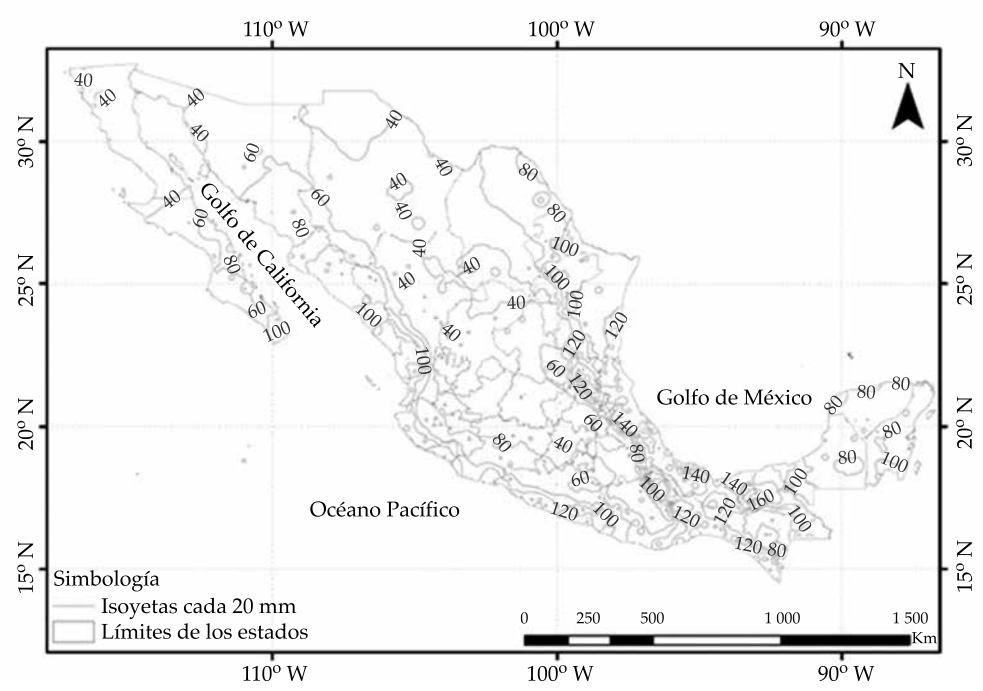

Figura 4. Distribución de las medias de las precipitaciones diarias máximas anuales en la república mexicana.
Fuente: Domínguez *et al.*, 2007. Proyecto Cenapred.

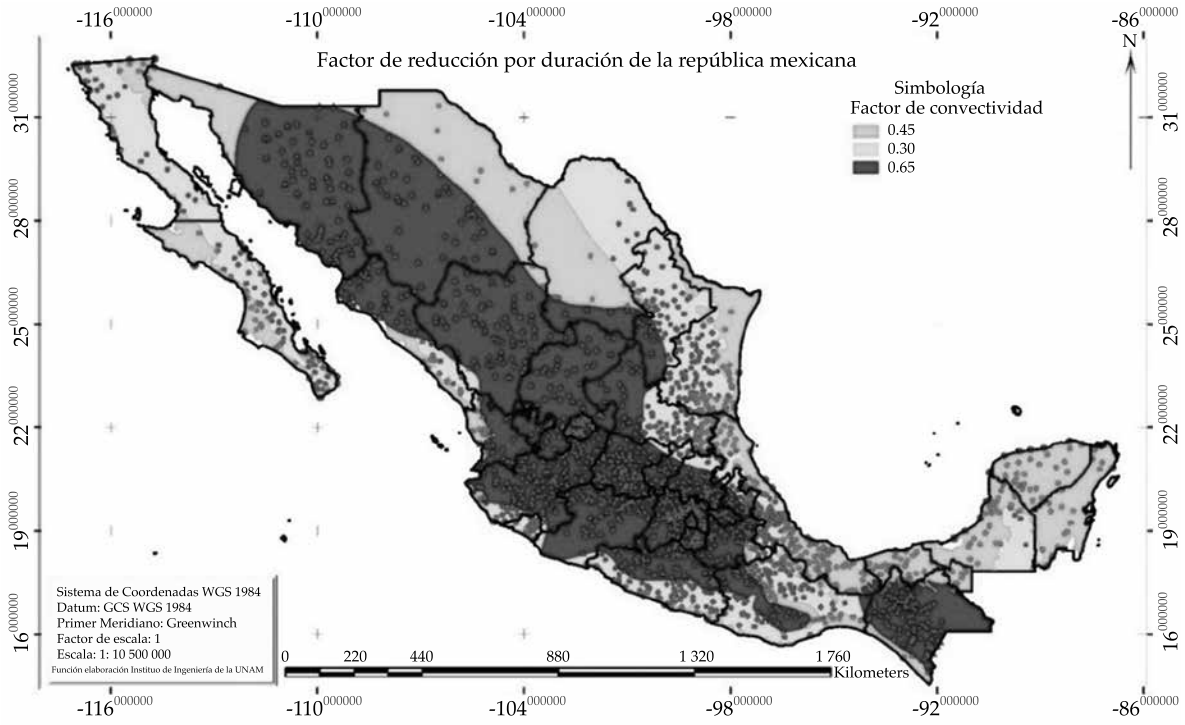

Figura 5. Mapa de factores de convectividad (Baeza, 2007).

ISSN 0187-8336 •

Cuadro 5. Factores $K_d^{(1)}$ en función de R y la duración d. Fuente: adaptado de Luna, 2013.

***d* (min)**	***d* (h)**	**$R = P_1^T / P_{24}^T$ *K* en función de *d* y el factor de convectividad**							
		***R* = 0.10**	***R* = 0.20**	***R* = 0.30**	***R* = 0.40**	***R* = 0.45**	***R* = 0.50**	***R* = 0.60**	***R* = 0.65**
10	0.17	0.293	0.39	0.432	0.454	0.462	0.469	0.481	0.487
15	0.25	0.38	0.485	0.536	0.565	0.575	0.584	0.6	0.608
30	0.5	0.612	0.699	0.745	0.773	0.79	0.793	0.809	0.816
60	1	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**
90	1.5	1.378	1.248	1.185	1.146	1.13	1.119	1.097	1.088
120	2	1.646	1.424	1.317	1.25	1.22	1.203	1.166	1.151
150	2.5	1.934	1.595	1.435	1.337	1.30	1.268	1.215	1.193
180	3	2.207	1.75	1.538	1.41	1.35	1.322	1.254	1.226
210	3.5	2.468	1.892	1.631	1.475	1.41	1.367	1.286	1.253
240	4	2.719	2.024	1.715	1.532	1.45	1.407	1.314	1.275
270	4.5	2.961	2.148	1.793	1.584	1.508	1.443	1.337	1.294
300	5	3.196	2.266	1.865	1.631	1.547	1.475	1.358	1.311
360	6	3.649	2.485	1.997	1.716	1.616	1.531	1.395	1.339
420	7	4.081	2.686	2.115	1.791	1.676	1.579	1.425	1.362
480	8	4.497	2.874	2.223	1.858	1.73	1.621	1.451	1.382
540	9	4.899	3.05	2.322	1.919	1.778	1.659	1.474	1.399
600	10	5.289	3.216	2.414	1.975	1.822	1.694	1.494	1.415
660	11	5.669	3.375	2.501	2.026	1.862	1.725	1.513	1.429
720	12	6.039	3.527	2.582	2.074	1.9	1.754	1.53	1.441
840	14	6.756	3.812	2.734	2.162	1.968	1.807	1.56	1.463
960	16	7.445	4.078	2.872	2.241	2.029	1.853	1.586	1.482
1080	18	8.112	4.328	2.999	2.313	2.084	1.895	1.609	1.499
1200	20	8.758	4.564	3.117	2.379	2.134	1.933	1.63	1.513
1320	22	9.388	4.789	3.228	2.441	2.18	1.968	1.649	1.527
1440	24	10.001	5.004	3.333	2.498	2.223	2	1.667	1.539

contar con tormentas de diseño de varios días. Por ello, se realizó el análisis de los datos históricos de las precipitaciones medias máximas anuales asociadas con duraciones de 2, 3,... 30 días consecutivos. Para cada estación i y cada año k de registro se obtuvo el cociente entre la precipitación máxima promedio correspondiente a cada duración y la correspondiente a un día, es decir:

$$R_{d,i,k} = \mathrm{PMAX}_{d,i,k} / \mathrm{PMAX}_{1,i,k} \qquad (2)$$

donde $\mathrm{PMAX}_{d,i,k}$ es la precipitación media máxima para una duración d, en días, una estación i y el año k.

Al hacer los promedios para todos los años de registro de la estación i se obtiene:

$$PM_{d,i} = \sum_k \left(R_{d,i,k}\right) / NK \qquad (3)$$

donde NK son los años de registro.

En seguida se calcularon, para cada región, los promedios obtenidos al considerar todas las estaciones:

$$PMR_d = \sum_i \left(PM_{d,i}\right) / NI \qquad (4)$$

donde NI es el número de estaciones de la región considerada.

• ISSN 0187-8336

Cuadro 6. Relaciones entre las precipitaciones medias máximas asociadas con diferentes duraciones y las correspondientes a un día.

Región	Núm. de valores	2D/1D	8D/1D	Región	Núm. de valores	2D/1D	8D/1D
Chiapas, Pichucalco	3	0.686	0.32	HGOMEN	58	0.667	0.287
Chiapas, Chicoasén	20	0.677	0.325	JALCOST	23	0.669	0.291
Chiapas, Almandro	11	0.693	0.332	JALINT	153	0.67	0.309
Chiapas, Teapa	3	0.69	0.313	MIH000	93	0.668	0.324
Chiapas, Malpaso	17	0.668	0.298	OAXALT	82	0.693	0.33
Chiapas, Angostura	36	0.697	0.341	OAXGOL	29	0.693	0.338
Peñitas	4	0.69	0.299	OAXPAC	4	0.667	0.319
Chiapas Costa	28	0.687	0.329	OAXITS	14	0.687	0.282
Tlaxcala	22	0.673	0.314	PUECEN	34	0.687	0.32
Yucatán	32	0.64	0.258	PUENOR	49	0.699	0.314
Morelos	44	0.681	0.331	PUESUR	14	0.664	0.311
Zacatecas, Zona 01	11	0.664	0.272	Querétaro, Zona Baja	26	0.666	0.281
Zacatecas, Zona 02	39	0.67	0.295	Querétaro, Zona Alta	7	0.702	0.319
Nuevo León, Región 1	9	0.66	0.259	Sinaloa, Zona I	21	0.599	0.212
Nuevo León, Región 2	7	0.623	0.223	Sinaloa, Zona II	30	0.622	0.247
Nuevo León, Región 3	38	0.656	0.242	SLP000	103	0.682	0.289
Ciudad de México	34	0.675	0.323	SONRE1	57	0.62	0.238
Colima	17	0.669	0.26	SONRE2	21	0.583	0.199
Guanajuato	106	0.678	0.31	SONRE3	2	0.585	0.169
Veracruz	182	0.687	0.304	TAMZ01	81	0.664	0.266
Chihuahua, restantes	40	0.646	0.26	TAMZ02	20	0.662	0.266
CHIBAJ	18	0.669	0.294	TAMZ03	8	0.654	0.265
AGS000	50	0.684	0.298	CAM000	44	0.658	0.283
COA000	34	0.628	0.219	DUR000	83	0.677	0.29
EDM000	114	0.673	0.329	TAB000	32	0.668	0.278
GUECEN	55	0.689	0.309	Nayarit, Costa	14	0.634	0.282
GUECOS	38	0.69	0.335	Nayarit, Sierra	11	0.682	0.322
GUENOR	36	0.669	0.321	BCN000	38	0.644	0.222
HGOMAY	8	0.708	0.313	BCS000	75	0.61	0.187

En el cuadro 6 se muestran los valores obtenidos para cada región y para las duraciones de 2 y 8 días; llama la atención la poca diferencia entre los valores obtenidos para las diferentes regiones, de manera que, por ejemplo, para la duración de 2 días, el 75% de los valores está entre 0.66 y 0.702, y para 8 días, más de 80% entre 0.26 y 0.34. En resumen, los resultados obtenidos en este estudio permiten obtener, para cualquier sitio de la república, valores de precipitación media asociados con distintos periodos de retorno, para duraciones entre 15 minutos y 30 días.

Ejemplo para interpretación de resultados

Para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, se plantea el siguiente ejemplo:

Supóngase que el centroide de una cuenca de la región Oaxaca Istmo tiene coordenadas -94.559 longitud oeste y 16.733 latitud norte, de

ISSN 0187-8336 •

tal manera que la media de las precipitaciones diarias máximas anuales sea de 140 mm (ver figura 4, o para mayor detalle la figura 6). De acuerdo con el cuadro 4, este valor se multiplica por 2.48 para estimar la precipitación asociada con 100 años de periodo de retorno, con lo que se obtiene un valor de 347.2 mm para la lluvia de un día con 100 años de periodo de retorno. Si el tiempo de concentración de la cuenca fuera de 1.5 h, se podría estimar un hietograma con intervalos de media hora y una duración total de 4 horas, de la siguiente forma. De acuerdo con la figura 7, el factor de convectividad sería de 0.45, por lo que la precipitación en 1 h resulta de 156.2 mm. Para dicho valor del factor de convectividad, el cuadro 5 indica los factores que deben considerarse para las distintas duraciones. Dichos factores se reproducen en el cuadro 7. La tercera columna del cuadro 7 se obtuvo multiplicando los factores por 156.2 mm;

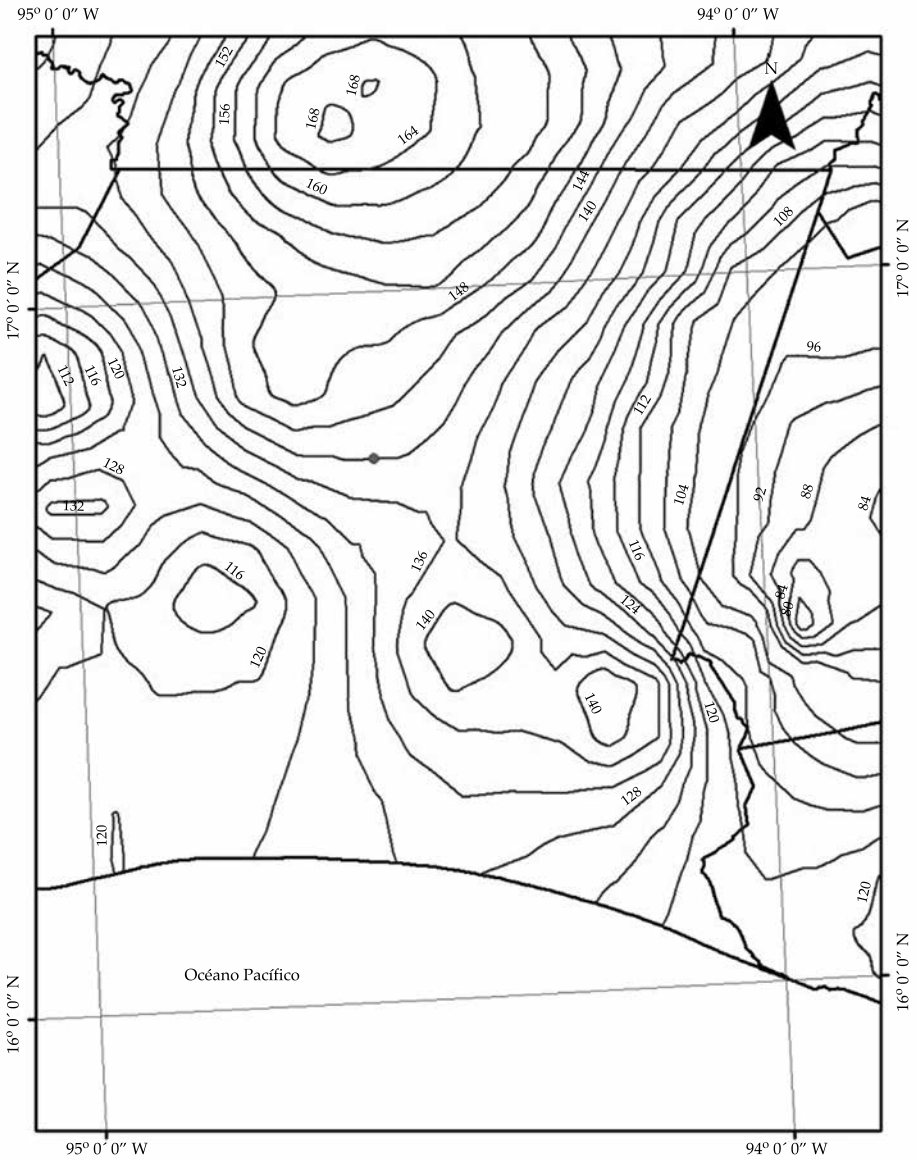

Figura 6. Región Istmo de Oaxaca (94.559 longitud oeste y 16.733 latitud norte).

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IX, núm. 1, enero-febrero de 2018, pp. 5-29
• ISSN 0187-8336

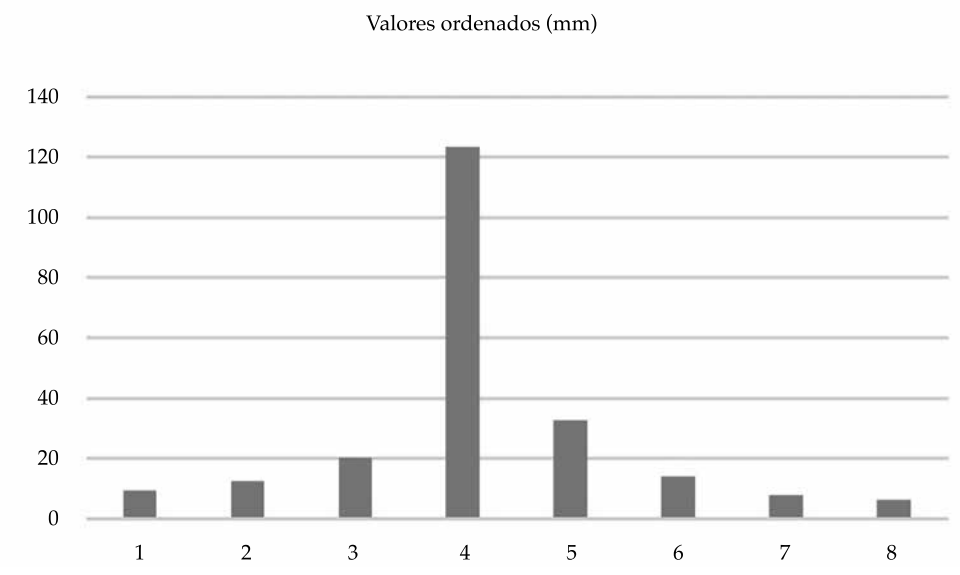

Figura 7. Hietograma para intervalos de 30 minutos y duración total de cuatro horas.

Cuadro 7. Estimación de un hietograma para intervalos de 30 minutos y duración total de 4 horas.

Duración minutos	Factor respecto a 1 h	Precipitación acumulada (mm)	Incremento (mm)	Valores ordenados (mm)
30	0.79	148.52	148.52	10.68
60	1.00	188.00	39.48	14.80
90	1.13	213.31	25.31	25.31
120	1.22	229.36	16.05	148.52
150	1.30	244.16	14.80	39.48
180	1.35	253.80	9.64	16.05
210	1.41	264.48	10.68	9.64
240	1.45	272.60	8.12	8.12

en la cuarta se indican los incrementos cada media hora, y en la quinta esos mismos valores ordenados por bloques alternos, de manera que se obtiene el hietograma de la figura 7.

Discusión

Los resultados obtenidos permiten estimar de manera robusta y espacialmente consistente lluvias para cualquier sitio de la república, cualquier periodo de retorno y cualquier duración. Con esos resultados se pueden construir también hietogramas de diseño.

Para comprobar el comportamiento estadísticamente homogéneo de los datos muestrales de precipitaciones máximas en una región, se usa tradicionalmente la prueba de Fisher, mediante la cual se comparan los cocientes de las varianzas correspondientes a los distintos sitios con los límites de la función de distribución de Fisher para una probabilidad de ser superados de, por ejemplo, el 5%.

Los valores obtenidos de los cocientes al cuadrado de los coeficientes de variación máxima entre el mínimo de cada región se muestran en el cuadro 8, en el que también se indica el tipo

ISSN 0187-8336 •

de función de distribución que mejor se ajustó a la muestra ampliada correspondiente a cada región.

El análisis del cuadro 8 muestra que, en algunos casos, el cuadrado del cociente entre el coeficiente de variación máximo y el mínimo presenta valores muy grandes, por lo que al aplicar la prueba de Fisher se llegaría a la conclusión de que algunas estaciones deberían eliminarse de la región correspondiente, a pesar de que se cuidó que para cada región se tuvieran climas y exposición a fenómenos meteorológicos similares y la separación entre regiones correspondiera a un parteaguas bien definido. Se nota también en el cuadro que la mayoría de estos casos corresponde a regiones

Cuadro 8. Relaciones entre los coeficientes de variación máximo y mínimo de las estaciones comprendidas en cada región.

Entidad federativa	Región	Número estaciones	Coef. var. máximo	Coef. var. mínimo	Relación al cuadrado	Función de distribución*
Aguascalientes	Aguascalientes	50	0.46	0.24	3.67	G
Baja California Norte	Baja California Norte	37	1.31	0.41	10.21	DG
Baja California Sur	Baja California Sur	72	1.36	0.46	8.74	DG
Campeche	Campeche	42	0.93	0.26	12.79	DG
Chiapas	Angostura	36	0.88	0.22	16.00	DG
	Malpaso	17	0.66	0.24	7.56	DG
	Chicoasén	21	0.79	0.22	12.89	DG
	Peñitas	4	0.51	0.26	3.85	DG
	Almandro	11	0.82	0.24	11.67	DG
	Pichucalco	3	0.35	0.29	1.46	G
	Teapa	3	0.50	0.23	4.73	G
	Costa	28	0.57	0.23	6.14	DG
Chihuahua	Bajos	18	0.43	0.22	3.82	G
	Restantes	40	0.96	0.24	16.00	DG
Coahuila	Coahuila	28	1.04	0.31	11.25	DG
Colima	Colima	17	0.68	0.39	3.04	DG
Distrito Federal	Distrito Federal	30	0.50	0.21	5.67	G
Durango	Durango	83	1.07	0.23	21.64	DG
Estado de México	Estado de México	114	0.50	0.20	6.25	G
Guanajuato	Guanajuato	108	0.49	0.22	4.96	G
Guerrero	Norte	36	0.48	0.18	7.11	G
	Centro	56	0.68	0.32	4.52	G
	Costa	37	0.61	0.21	8.44	DG
Hidalgo	Menores	57	0.70	0.22	10.12	G
	Mayores	5	0.52	0.43	1.46	G
Jalisco	Interior	153	0.53	0.20	7.02	G
	Costa	23	0.58	0.30	3.74	G
Michoacán	Michoacán	93	0.65	0.18	13.04	G
Morelos	Morelos	44	0.64	0.20	10.24	G
Nayarit	Costa	14	0.40	0.25	2.56	G
	Sierra	11	0.33	0.19	3.02	G
Nuevo León	I	10	0.93	0.29	10.28	DG
	II	7	0.63	0.39	2.61	DG

• ISSN 0187-8336

Cuadro 8 (continuación). Relaciones entre los coeficientes de variación máximo y mínimo de las estaciones comprendidas en cada región.

Entidad federativa	Región	Número estaciones	Coef. var. máximo	Coef. var. mínimo	Relación al cuadrado	Función de distribución*
	III	38	1.01	0.38	7.06	DG
Oaxaca	Golfo	29	0.53	0.26	4.16	G
	Altiplano	82	0.74	0.18	16.90	DG
	Istmo	14	0.56	0.37	2.29	DG
	Pacífico	4	0.59	0.43	1.88	DG
Puebla	Norte	49	0.79	0.26	9.23	G
	Centro	34	0.67	0.21	10.18	G
	Sur	14	0.52	0.19	7.49	G
Querétaro	Zona Alta	7	0.49	0.26	3.55	G
	Zona Baja	27	0.64	0.24	7.11	G
Quintana Roo	Quintana Roo	20	0.64	0.28	5.22	DG
San Luis	San Luis	103	0.94	0.27	12.12	DG
Sinaloa	Zona I	21	0.77	0.39	3.90	DG
	Zona II	30	0.62	0.20	9.61	G
Sonora	Zona I	57	0.85	0.17	23.90	G
	Zona II	21	0.77	0.33	5.44	DG
	Zona III	2	0.77	0.77	1.00	DG
Tabasco	Tabasco	32	0.53	0.24	4.88	G
Tamaulipas	Zona I	81	0.87	0.27	10.38	DG
	Zona II	20	0.91	0.35	6.76	DG
	Zona III	8	0.51	0.31	2.71	DG
Tlaxcala	Tlaxcala	22	0.44	0.22	4.00	G
Veracruz	Veracruz	190	0.79	0.20	15.60	DG
Yucatán	Yucatán	30	0.68	0.30	5.13	G
Zacatecas	Zona I	11	0.54	0.28	3.72	G
	Zona II	39	0.45	0.22	4.18	G
	Total	2293				

*G: Gumbel; DG: doble Gumbel.

en las que el mejor ajuste para la muestra ampliada se obtuvo con la función doble Gumbel. Dos casos muy notables son Sonora zona 1 y Veracruz, por lo que en seguida se comentan esos dos casos. En Sonora, el CV más grande (.85) fue en la estación 26034, en la que, en el año 1972 se tiene registrado un máximo de 407 mm, siendo que en ese año, de todas las demás estaciones, lo máximo medido fue de 176 mm, y en todo el periodo de registro de todas las estaciones lo máximo medido fue de 240 mm; si se elimina el CV de los máximos en esa estación quedaría de 0.525. En el otro extremo, el valor de CV mínimo es de 0.174 y corresponde a la estación 26101, en la que el máximo registrado es muy bajo (106 mm), a pesar de que la media es una de las más altas de la región, posiblemente porque no registró en los años en que ocurrieron las mayores tormentas (1978, 1994 y 2007). Si se eliminan estos dos valores, los CV extremos quedan en 0.69 (en la estación 26010 que sí midió en los años críticos) y 0.211, de manera que el cociente al cuadrado resulta de 10.6, en lugar de 23.9; si

ISSN 0187-8336 •

todavía se eliminan los dos valores extremos, el cociente al cuadrado resulta de 3.89.

Algo parecido ocurre en Veracruz, donde se tiene un registro de 690 mm en la estación 30031 en 1978, año que no se caracterizó por grandes tormentas, y en el que el máximo registrado en las otras 189 estaciones fue de 364 mm. Si se elimina ese valor, el CV máximo resulta de 0.67 y el cuadrado del cociente entre valores extremos se reduce de 15.60 a 11.2. Además, si de las 190 estaciones de esta región se eliminan también los dos valores más pequeños del CV, el cociente se reduce a 7.2, valor que resulta lógico, si se considera que corresponde a 187 estaciones.

Generación de series sintéticas

Considerando que se trata de eventos extremos, cuya distribución de probabilidades no es Normal, se realizaron pruebas mediante la comparación entre los coeficientes de variación de las muestras históricas y los que se obtienen al generar números aleatorios con la distribución de probabilidades ajustada a las muestras regionales. Para cada una de las 59 regiones se generaron 10 muestras sintéticas, con el mismo número de valores que los de la muestra histórica correspondiente. En las figuras 8 y 9 se comparan las distribuciones de frecuencias acumuladas de los CV históricos y sintéticos para los casos extremos de las regiones Morelos, y La Angostura en Chiapas. En cada caso se generaron 10 muestras sintéticas, cada una de las cuales constaba del mismo número de valores que el de años registrados en cada estación de la región correspondiente.

En el primer caso (región Morelos) se observa un buen comportamiento, excepto para una estación con un coeficiente de variación de 0.64 (que fue el máximo en esa zona en la que el siguiente valor fue de 0.45). La estación es la número 17045 y en sus datos de precipitaciones máximas anuales aparece un valor de 200 mm en 1977, año en el que lo máximo registrado en todas las demás estaciones fue de 87 mm, por lo que se recurrió a verificar el dato, con ayuda de la GASIR, en el registro original, y se encontró que el máximo en ese año fue en realidad de

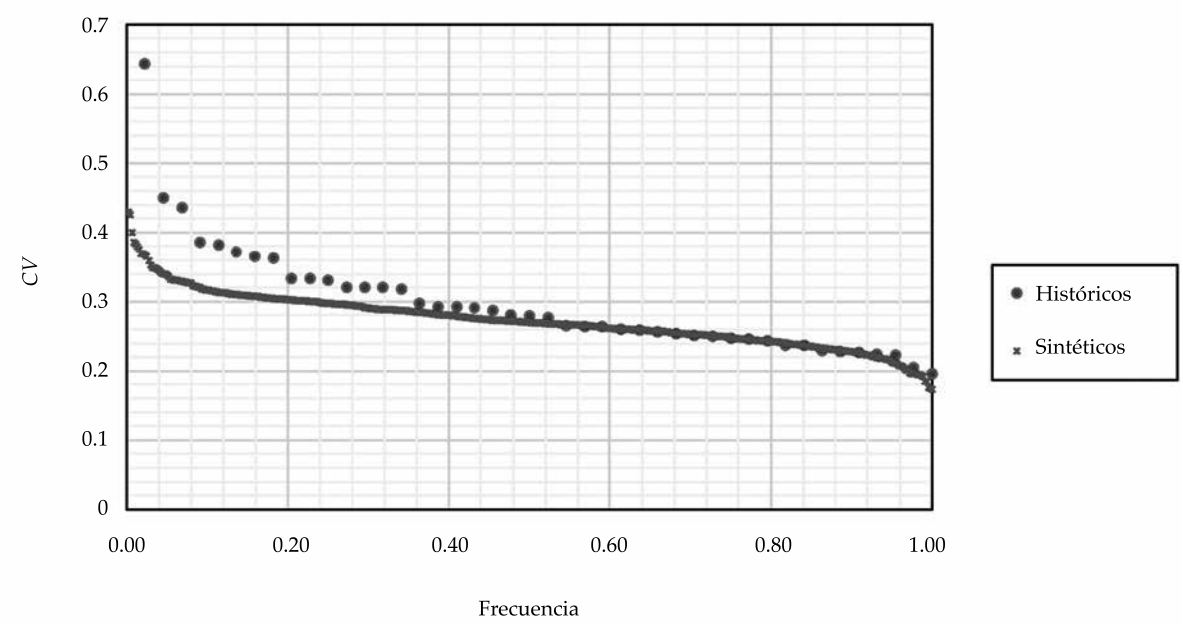

Figura 8. Comparación entre las frecuencias empíricas de los coeficientes de variación de la muestra histórica y la muestra generada. Región Morelos.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IX, núm. 1, enero-febrero de 2018, pp. 5-29
• ISSN 0187-8336

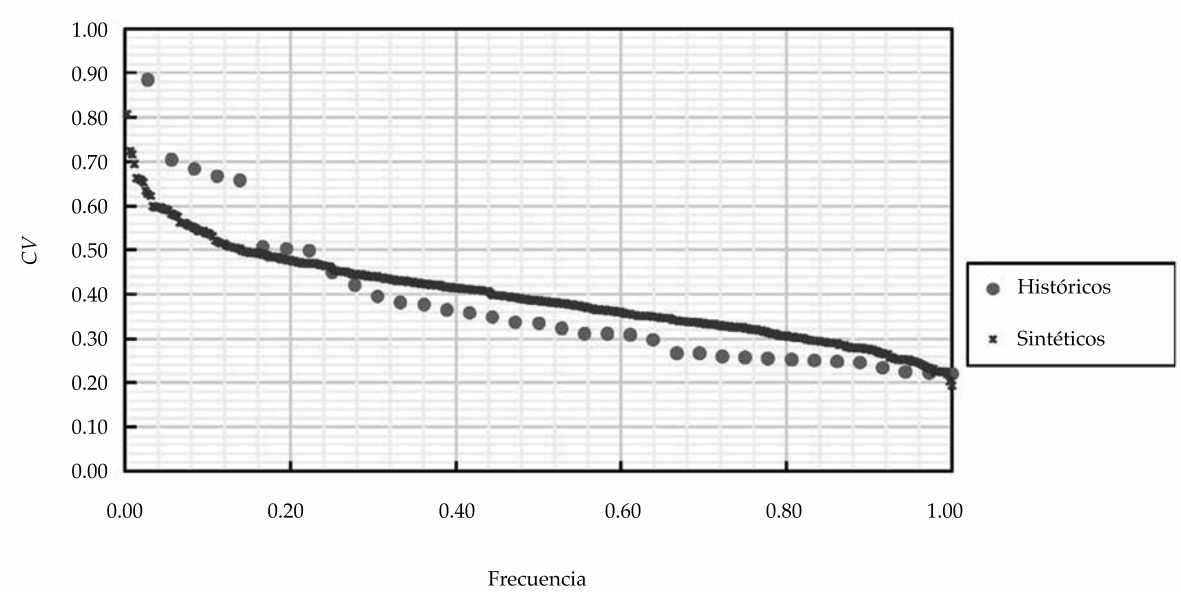

Figura 9. Comparación entre las frecuencias empíricas de los coeficientes de variación de la muestra histórica y la muestra generada. Región La Angostura, en Chiapas.

57.4 y al modificarlo el coeficiente de variación bajó a 0.332.

En el caso de la región Angostura, en Chiapas, aunque el comportamiento de las frecuencias relativas de los CV históricos y los CV generados es similar (figura 9), el valor del CV máximo histórico (0.88, correspondiente a la estación 7119, con 66 años de registro) es mayor que el máximo generado con las 10 muestras sintéticas (0.81), por lo que se procedió a analizarlo con mayor detalle, y se encontró que corresponde a un registro de 320 mm el 5 de octubre de 2005, fecha en la que se presentaron varios valores altos en las estaciones cercanas, por lo que se decidió conservar ese valor.

En el cuadro 9 se muestran los coeficientes de variación de cada una de las otras 12 regiones (de las 59 consideradas), en las que el cuadrado del cociente de los coeficientes de variación es mayor que 10.

Para cada una de estas 12 regiones se generaron también 10 muestras sintéticas, cada una con el mismo número de valores que el registro histórico. En el cuadro 9 se marcaron con verde los coeficientes de variación históricos mayores en más de 20% que el máximo obtenido con las series generadas, y con amarillo los que son mayores o menores que los valores extremos obtenidos con las muestras generadas, pero en los que las diferencias son menores al 20%. Se puede observar que de las 12 regiones, en cinco el coeficiente de variación CV histórico supera al sintético en más del 20%, y en una hay dos estaciones en las que esto ocurre; hay además 13 estaciones (de las más de 2 000 estudiadas) en las que el coeficiente de variación histórico supera al sintético, pero en menos del 20%, y ocho en las que el CV histórico mínimo es menor que el sintético en menos de 20%. Para los casos que parecieron más extraños se hizo una solicitud de verificación a la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) de la Conagua, con los resultados que se muestran en el cuadro 10. De acuerdo con la información proporcionada por la GASIR, los valores de los coeficientes de variación del cuadro 8 se modifican de la siguiente forma:

El valor de 1.315 de BCN cambia a 0.817; el 0.934 de Campeche pasó a 0.74; el 0.792 de Chicoasén es correcto; el 0.822 de Almandro

ISSN 0187-8336 •

Cuadro 9. Coeficientes de variación de cada estación para las 12 regiones (de las 59 consideradas) en las que el cuadrado del cociente de los coeficientes de variación es mayor que 10.

BCN	Campeche	Chiapas	Chiapas	Chihuahua	Coahuila	Durango	Hidalgo	Michoacán	Oaxaca	Puebla	Nuevo León
		Chicoasén	Almandro	Restantes			Menores		Altiplano	Centro	Reg. 1
Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.
1.315	0.934	0.792	0.822	0.958	1.044	1.070	0.700	0.647	0.738	0.669	0.933
0.969	0.658	0.461	0.465	0.714	0.875	0.879	0.620	0.618	0.680	0.483	0.573
0.950	0.655	0.409	0.410	0.662	0.744	0.634	0.602	0.593	0.662	0.481	0.522
0.826	0.643	0.389	0.406	0.655	0.632	0.583	0.569	0.586	0.648	0.438	0.499
0.777	0.635	0.386	0.383	0.601	0.628	0.582	0.535	0.555	0.598	0.393	0.475
0.776	0.634	0.367	0.369	0.599	0.624	0.561	0.516	0.501	0.588	0.386	0.433
0.738	0.627	0.365	0.312	0.492	0.609	0.523	0.515	0.494	0.565	0.376	0.418
0.663	0.596	0.350	0.308	0.489	0.597	0.521	0.513	0.490	0.564	0.375	0.355
0.616	0.594	0.330	0.298	0.484	0.596	0.513	0.512	0.449	0.557	0.371	0.322
0.602	0.579	0.326	0.264	0.482	0.591	0.505	0.502	0.440	0.557	0.355	0.289
0.596	0.576	0.296	0.245	0.479	0.588	0.502	0.497	0.435	0.557	0.355	
0.581	0.554	0.286		0.469	0.553	0.492	0.485	0.435	0.554	0.354	
0.581	0.544	0.272		0.467	0.548	0.485	0.472	0.427	0.537	0.352	
0.572	0.540	0.272		0.457	0.529	0.484	0.464	0.425	0.532	0.332	
0.571	0.512	0.269		0.455	0.513	0.481	0.448	0.417	0.526	0.331	
0.570	0.511	0.266		0.442	0.510	0.480	0.447	0.411	0.513	0.331	
0.570	0.511	0.246		0.437	0.497	0.477	0.444	0.409	0.505	0.324	
0.556	0.503	0.237		0.435	0.497	0.454	0.433	0.404	0.500	0.323	
0.550	0.478	0.234		0.432	0.495	0.453	0.430	0.395	0.491	0.318	
0.550	0.473	0.219		0.429	0.491	0.452	0.428	0.394	0.477	0.308	
0.545	0.465			0.427	0.491	0.450	0.420	0.390	0.466	0.300	
0.528	0.461			0.417	0.490	0.447	0.420	0.381	0.458	0.289	
0.528	0.461			0.412	0.490	0.440	0.408	0.376	0.432	0.287	
0.520	0.459			0.411	0.482	0.438	0.404	0.374	0.428	0.285	
0.517	0.458			0.404	0.466	0.433	0.402	0.373	0.427	0.279	
0.516	0.454			0.399	0.462	0.432	0.400	0.368	0.418	0.272	
0.510	0.445			0.398	0.444	0.431	0.389	0.365	0.410	0.266	
0.507	0.436			0.395	0.436	0.431	0.387	0.364	0.408	0.265	
0.482	0.436			0.364	0.435	0.429	0.387	0.361	0.406	0.263	
0.477	0.432			0.352	0.429	0.423	0.382	0.360	0.404	0.255	
0.476	0.424			0.340	0.428	0.419	0.378	0.358	0.402	0.252	
0.469	0.419			0.335	0.404	0.415	0.362	0.357	0.401	0.244	
0.459	0.412			0.328	0.369	0.414	0.354	0.349	0.399	0.244	
0.450	0.412			0.319	0.321	0.408	0.354	0.349	0.398	0.210	
0.440	0.394			0.317	0.313	0.406	0.351	0.348	0.390		
0.421	0.381			0.315		0.405	0.342	0.339	0.387		
0.420	0.374			0.303		0.401	0.339	0.339	0.381		
0.407	0.367			0.279		0.399	0.334	0.338	0.380		
	0.366			0.263		0.393	0.330	0.333	0.373		
	0.363			0.240		0.389	0.326	0.333	0.369		

• ISSN 0187-8336

Cuadro 9 (continuación). Coeficientes de variación de cada estación para las 12 regiones (de las 59 consideradas) en las que el cuadrado del cociente de los coeficientes de variación es mayor que 10.

BCN	Campeche	Chiapas	Chiapas	Chihuahua	Coahuila	Durango	Hidalgo	Michoacán	Oaxaca	Puebla	Nuevo León
		Chicoasén	Almandro	Restantes			Menores		Altiplano	Centro	Reg. 1
Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.
	0.360					0.385	0.324	0.333	0.368		
	0.344					0.384	0.323	0.330	0.367		
	0.335					0.379	0.319	0.329	0.366		
	0.303					0.379	0.315	0.328	0.363		
	0.288					0.373	0.309	0.324	0.363		
	0.263					0.370	0.307	0.320	0.358		
						0.367	0.306	0.317	0.354		
						0.366	0.297	0.315	0.354		
						0.365	0.293	0.313	0.353		
						0.365	0.288	0.311	0.350		
						0.362	0.285	0.310	0.348		
						0.362	0.272	0.308	0.348		
						0.361	0.271	0.307	0.348		
						0.357	0.265	0.305	0.344		
						0.357	0.260	0.303	0.340		
						0.354	0.249	0.303	0.340		
						0.354	0.229	0.301	0.340		
						0.354	0.218	0.295	0.339		
						0.350		0.293	0.338		
						0.349		0.292	0.315		
						0.346		0.290	0.312		
						0.341		0.289	0.311		
						0.339		0.288	0.309		
						0.337		0.288	0.307		
						0.334		0.284	0.304		
						0.329		0.283	0.297		
						0.325		0.281	0.295		
						0.315		0.281	0.294		
						0.299		0.280	0.287		
						0.298		0.274	0.282		
						0.298		0.272	0.282		
						0.282		0.272	0.276		
						0.279		0.267	0.275		
						0.276		0.260	0.273		
						0.275		0.257	0.272		
						0.273		0.255	0.258		
						0.266		0.247	0.253		
						0.266		0.246	0.251		
						0.260		0.244	0.241		
						0.253		0.243	0.241		

ISSN 0187-8336 •

Cuadro 9 (continuación). Coeficientes de variación de cada estación para las 12 regiones (de las 59 consideradas) en las que el cuadrado del cociente de los coeficientes de variación es mayor que 10.

BCN	Campeche	Chiapas	Chiapas	Chihuahua	Coahuila	Durango	Hidalgo	Michoacán	Oaxaca	Puebla	Nuevo León
		Chicoasén	Almandro	Restantes			Menores		Altiplano	Centro	Reg. 1
Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.	Coef. var.
						0.251		0.241	0.202		
						0.238		0.231	0.175		
						0.228		0.231			
								0.230			
								0.229			
								0.221			
								0.220			
								0.208			
								0.207			
								0.199			
								0.198			
								0.186			
								0.180			

Cuadro 10. Resultados de la verificación de datos dudosos.

Datos dudosos de estaciones climatológicas						
Estado	Estación	Valor (mm)	Año	Mes	Día	
Baja California Norte	2046	240	1972	10	4	GASIR recomienda eliminarlo
	2046	170	1973	9	25	GASIR no encuentra información, se eliminó
Campeche	4006	380	1950	10	8	Dice GASIR que es 38
	4006	200	1995	8	20	Correcto
Chiapas	7033	400.9	1985	7	6	Dice GASIR que es 40.9
	7067	201.1	1970	7	5	Correcto
Puebla	21114	250	1963	7	3	correcto
	21080	179.1	2000			Es 17.9
		171	1999	9	13	Es 17.1
Sonora	26034	407	1972	8	9	Correcto
Veracruz	30031	690	1978	7	10	GASIR no encuentra información, se eliminó
Morelos	17045	200	1977	8	24	Es 57.4 el día 12
Chihuahua	8005	320	1929			Eliminarlo, el máx mensual es 8 mm
Coahuila	5003	280	1976	9	19	Es 28
	5003	200	1978	9	27	GASIR no encuentra información, se eliminó
	5003	280	1977	7	14	Es 20
Durango	10016	280	1997	7	27	GASIR no encuentra información, se eliminó
	10033	250	1974	9	2	Dato correcto
		240	1987	8	30	GASIR no encuentra información, se eliminó
	10045	220	1978	8	30	Correcto
Nuevo León	19009	324	2010	6	31	Correcto, huracán *Alex*
		243	2005	7	20	Correcto, huracán *Emily*

• ISSN 0187-8336

pasó a 0.51; para Chihuahua desaparece el 0.958, para Coahuila desaparece el 1.044; para Durango desaparece el 1.070 y el 0.879 pasa a 0.755; y para Puebla centro desaparece el 0.669. Es decir, que con estas correcciones sólo quedan dos estaciones en las que el CV histórico supera al sintético en más del 20%, y 12 en las que lo supera, pero en menos del 20%.

Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se analizó el registro de precipitaciones máximas anuales obtenido para 2 193 estaciones con más de 20 años de registro. Se muestra la importancia de realizar un esfuerzo para depurar los datos de precipitaciones diarias máximas anuales obtenidos de la base de datos CLICOM. Con los datos depurados se definieron 59 regiones consideradas homogéneas (en relación con las precipitaciones diarias máximas anuales). Para definir las regiones se consideraron los coeficientes de variación de las precipitaciones máximas anuales registradas en cada estación, pero también su ubicación geográfica y el grado de exposición a fenómenos meteorológicos extremos.

La hipótesis de homogeneidad se verificó con un método propuesto en este trabajo, que se basa en generar muestras sintéticas obtenidas de la función de distribución de las lluvias máximas anuales moduladas, dividiendo cada valor entre la media de dichos máximos correspondiente a cada estación.

El análisis de los registros de las 2 193 estaciones que cumplieron con las condiciones planteadas permitió llegar a resultados con los que se pueden obtener, de manera confiable, los valores de precipitación asociados con cualquier periodo de retorno tanto para duraciones menores de un día como para duraciones entre 1 y 30 días, para cualquier sitio de la república mexicana.

El método utilizado se basa en obtener un mapa con los valores de las medias de las precipitaciones máximas anuales, medias que se consideran muy confiables, porque en todos los casos fueron calculadas con al menos 20 años de registro. Para obtener los valores correspondientes a distintos periodos de retorno, los valores de la media de cada estación se multiplican por factores regionales obtenidos para 59 regiones homogéneas.

Se presenta una discusión amplia respecto a la definición de las 59 regiones consideradas homogéneas. Dicha discusión muestra, por un lado, que la prueba de Fisher no es suficiente para comparar los coeficientes de variación obtenidos en cada región (principalmente porque está diseñada para muestras que se ajustan a una distribución Normal) y que se puede realizar un análisis más completo generando muestras sintéticas que correspondan a la función de distribución real, de manera que se puede comparar la curva de frecuencias acumuladas de los CV obtenidas a partir de esas muestras con la correspondiente a los valores históricos.

Para pasar de los valores correspondientes a duraciones menores que un día se utilizó la teoría de Chen, pero adaptada por Baeza a las condiciones de México. Los resultados permiten estimar hietogramas de diseño para cuencas con tiempos de concentración menores que un día. En el caso de las lluvias asociadas con duraciones mayores que un día (que se requieren para el análisis de cuencas grandes), se lograron obtener, para todas las regiones, factores que las relacionan con las de un día, de manera que pueden obtenerse hietogramas de diseño con valores diarios.

Se recomienda realizar estudios en toda la república (existen ya algunos para regiones específicas) que permitan estimar factores de reducción por área, con los cuales se pueda pasar de los hietogramas puntuales a los que se refieren los párrafos anteriores a hietogramas promedio para cada cuenca.

La información detallada de los distintos resultados de este estudio (mapas como el de la figura 6, funciones de distribución ajustada a los máximos anuales normalizados para cada una de las 59 regiones, etc.) puede ser solicitada a los autores de este trabajo.

ISSN 0187-8336 •

Agradecimientos

Agradecemos al Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) el apoyo para realizar esta investigación; a los maestros Carlos Baeza y Manuel Mendoza por las facilidades otorgadas para el manejo de los datos que recopilaron; a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes por las facilidades que nos dieron para utilizar sus archivos, y a la Conagua por su apoyo para verificar algunos datos en el registro original. Al ingeniero Mario Roldán Leal por el apoyo en la preparación del artículo con el formato de la guía de autores.

Referencias

Baeza, R. C. (2007). *Estimación regional de factores de convectividad para el cálculo de las relaciones intensidad-duración-frecuencia*. Tesis de Maestría. México, DF: Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.

Bell, F. C. (1969). Generalized rainfull-duration-frecuency relationships (P. o. Engineers, Ed.). Journal of the Hydraulics Division, *95*(HY1), 311-327.

Berndtsson, R., & Niemczynowicz, J. (1988). Spatial and temporal scales in rainfall analysis - some aspects and future perspectives. *Journal of Hydrology*, (100), 293-313.

Buishand, T. A. (1991). Extreme rainfall estimation by combining data from several Sites. *Hydrological Sciences Journal*, *36*(4), 345-365, DOI: 10.1080/02626669109492519.

Campos-Aranda, D. F. (2008). Ajuste regional de la distribución GVE en 34 Estaciones pluviométricas de la zona Huasteca de San Luis potosí, México/Regional fit of GEV distribution in 34 pluviometric stations of the Huasteca area in San Luis Potosi State, Mexico. *Agrociencia*, *42*(1), 57-70.

Campos-Aranda, D. F. (2014). Análisis regional de frecuencia de crecientes en la región hidrológica no. 10 (Sinaloa), México. 1: índices de estacionalidad y regiones de influencia/Regional flood frequency analysis at hydrological region no. 10 (Sinaloa), Mexico. 1: Seasonality measures and regions of influence. *Agrociencia*, *48*(2), México.

Chen, C. L. (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas (ASCE, Ed.). *Journal of Hydraulic Engineering*, *109*(12), 1603-1621.

Chow, D. R., Maidment, L., & Mays, W. (1988). *Applied hydrology* (572 pp.). McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. New York: McGraw-Hill. New York

Conagua (2015). *Atlas del agua en México 2015*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf.

Conde, R. R., Vita, G. A., Castro, O. V. A., & López, M. J. R. (2014). Construcción de curvas i-d-tr de las estaciones climatológicas de México a partir de la base de datos pluviométricos SMN-Conagua. *Memorias del XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

Conleth, C. (1988). Methods and merits of regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, *100*, 269-290.

Cortés, L. C. N. (2003). *Regionalización de tormentas de diseño en la cuenca del Valle de México. Proyecto terminal* (63 pp.). México, DF: UAM Iztapalapa. Recuperado de http://148.206.53.84/tesiuami/UAMI10552.pdf.

Cunnane, C. (1988). Methods and merits of regional flood frequency analysis. *J. Hydrol.*, *100*, 269-290.

Dalrymple, T. (1960). *Flood frequency analysis. Manual of hydrology: Part 3. Flood flow techniques. Methods and practices of the geological survey* (80 pp.). Washington, DC: US Gorvernment Printing Office.

Domínguez, M. R., Capella, V. A., Luna, V. J. A., Fuentes, M. O. A., Carrizosa, E. E., Peña, D. F., & Carabela, H. J. C. (2014). *Cap. A.1.6. Análisis estadístico sección A: hidrotecnia. Tema 1: hidrología. Manual de diseño de obras civiles*. México, DF: Comisión Federal de Electricidad.

Domínguez, M. R., Carrizosa, E. E., Fuentes, M. G. E., Galván, T. A. E., Salas, S. M. A., Robles, M. T. P., Baeza, R. C., & González, O. S. (2012). Mapas de precipitaciones para diferentes periodos de retorno y duraciones. *Memorias del XXII Congreso Nacional de Hidráulica*, Acapulco, Guerrero, México.

Dominguez-Mora, R., Bouvier, C., Neppel, L., & Niel, H. (2005). Approche régionale pour l'estimation des distributions ponctuelles des pluies journalières dans le Languedoc-Roussillon (France). *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, *50*(1), 1-29.

Escalante-Sandoval, C. A., & Domínguez-Esquivel, J.Y. (2001). Análisis regionales de precipitación con base en una distribución bivariada ajustada por máxima entropía. *Ingeniería Hidráulica en México*, *16*(3), 91-102.

Escalante, C., & L. Reyes. (2005) Técnicas Estadísticas en Hidrología. Facultad de Ingeniería, UNAM. 1110 p. México. 2005.

Escalante-Sandoval, C. A., & Amores-Rovelo, L. (2014). Influencia de la delimitación de regiones homogéneas en la estimación de lluvias máximas diarias (pp. 1-6). *Memorias del XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*, Puerto Vallarta, Jalisco, México, octubre 2014,

Gellens, D. (2002). Combining regional approach and data extension procedure for assessing GEV distribution of extreme precipitation in Belgium. *Journal of Hydrology*, *268*, 113-126.

Guichard, R. D., & Domínguez, M. R. (1988). Regionalización de lluvias en la cuenca del Alto Grijalva. *Quehacer Científico en Chiapas*, *1*(2), 83-93.

Koutsoyiannis, D. (2009a). *Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation*. Zographou,

• ISSN 0187-8336

Greece: Department of Water Resources, Faculty of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Heroon Polytechneiou, 5, GR-157 80.

Koutsoyiannis, D. (2009b). *Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II. Empirical investigation of long rainfall records*. Zographou, Greece: Department of Water Resources, Faculty of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Heroon Polytechneiou, 5, GR-157 80.

Luna, V. J. A. (2013). *Predicción y pronóstico de tormentas en regiones de montaña - aplicación en la cuenca del río La Paz, Bolivia*. Tesis doctoral. México, DF: Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.

Magaña, R. V. O., & Galván, O. V. M. (2010). Detección y atribución de cambio climático a escala regional. Realidad datos y espacio. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, *1*(1), 73-82.

Mendoza, G. M. (2001). *Factores de regionalización de lluvias máximas en la república mexicana*. Tesis de Maestría. México, DF: Facultad de Ingeniería, UNAM.

Rossi, F., Fiorentino, M., & Versace, P. (1984). Two-component extreme value distribution for flood frequency analysis. *Water Resources Research*, *20*(7), 847-856.

SCT (1990). *Isoyetas de intensidad-duración-frecuencia. República mexicana* (495 pp.). México, DF: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura.

St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. J., Lachance, M., Bobée, B., Barbet, M., & Bruneau, P. (2003). La régionalisation des précipitations: une revue bibliographique des développements. Récents Revue des sciences de l'eau. *Journal of Water Science*, *16*(1), 27-54.

Yang, T., Shao, Q., Hao, Z.-C., Chen, X., Zhang, Z., Xu, C. Y., & Sun, L. (2010) Regional frequency analysis and spatio-temporal pattern characterization of rainfall extremes in the Pearl River Basin, China. *Journal of Hydrology*, *380*, 386-405.

Wotling, G., Bouvier, Ch., Danloux, J., & Fritsch, J. M. (2000). Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment. *Journal of Hydrology*, (233), 86-101.

Dirección institucional de los autores

Dr. Ramón Domínguez
M.I. Eliseo Carrizosa
M.I. Guadalupe E. Fuentes
Dra. Maritza L. Arganis
M.I. Javier Osnaya
M.I. Andrés E. Galván-Torres

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Instituto de Ingeniería
Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán
04510 Ciudad de México, México
rdominguezm@iingen.unam.mx
ecarrizosae@iingen.unam.mx
gfuentesm@iingen.unam.mx
marganisj@iingen.unam.mx
josnayar@iingen.unam.mx
andresgalvant@gmail.com